

レーザーリモートセンシングを用いた コンクリートはく離検知装置の開発

御崎 哲一*1・篠田 昌弘*2・島田 義則*3・オレグ コチャエフ*4

コンクリート表面の一般的な検査法として打音法が用いられている。打音法は簡易であるものの、技術者間で検査結果が異なることや、多大な検査時間を要するなどの課題がある。そこで、本研究では、レーザーによる加振と遠隔探傷が可能なコンクリート表面の非破壊検査法を開発した。合せて、取得したデータを判別する、コンクリートはく離判定アルゴリズムを提案した。開発した装置を用いて室内試験を実施して、基本性能を確認したのち、新幹線トンネルの覆工に適用した結果、保守用車や発電機の振動や騒音などが計測精度に影響を及ぼすが、対策をとることで、計測ができることを確認した。開発した装置と判定アルゴリズムにより、コンクリート表面の非破壊検査法の有効性を確認した。

キーワード：レーザー、リモートセンシング、コンクリート欠陥、打音検査、スペクトル

1. はじめに

現在の社会の礎を築いているコンクリート構造物において、コンクリートの劣化によるはく落が危惧されている。とくに1999年、山陽新幹線福岡トンネル(図-1)などにおいて発生したコンクリート塊はく落事故¹⁾は、コンクリート構造物の検査の重要性を再認識させた。

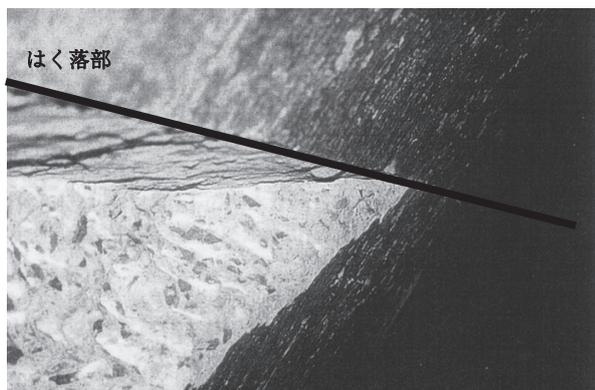


図-1 福岡トンネルコンクリート塊はく落事故部

鉄道土木構造物の維持管理における検査では、定期的実施する定期検査(以下、全般検査と呼ぶ)と地震や風水害後に必要に応じて実施する不定期な検査(以下、随時検査と呼ぶ)に大別できる²⁾。定期的実施する全般検査では、基本的には目視によって構造物の健全度を評価する。鉄道土木構造物の全般検査や随時検査において、変状の種類、程度および進行性などに関する調査結果に基づき、総合的に健全度の判定を行い、不健全と評価された場合には、緊急に使用制限などの措置を講じたり、さらに必要に応じ詳細な検査(個別検査と呼ぶ)を実施する。

コンクリート表面の浮きや欠陥を検査する手法としては、弾性波探傷法、赤外線検出法、打音法などがあり、その長所と短所を表-1にまとめた。いずれも一長一短があり、高い精度で迅速に検査を実施できる手法ではない。

現在の主たる検査手法である打音法は、検査対象となるコンクリート表面までの距離が手の届かない位置にある場合、高所作業車を使用し接近しなければならない。とくに、トンネルは、検査対象となるコンクリート表面が地上より高い箇所であり、かつ、検査箇所数が膨大になるため、検査技術者の負担は著しく大きく、多大な検査時間を要する。



*1 Norikazu MISAki

西日本旅客鉄道(株)
技術開発部 課長代理



*2 Masahiro SHINODA

(公財)鉄道総合技術研
究所 基礎・土構造
主任研究員



*3 Yoshinori SHIMADA

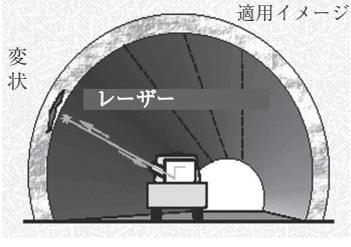
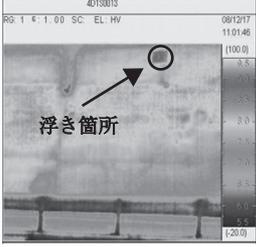
(公財)レーザー技術総合研
究所 レーザー計測チーム
主任研究員



*4 Oleg KOTYAEV

(公財)レーザー技術総合研
究所 レーザー計測チーム
研究員

表 - 1 コンクリート部材の主要な非破壊検査法と提案手法の比較

	レーザーリモートセンシング法	弾性波探傷法	赤外線検出法	打音法
				
長所	<ul style="list-style-type: none"> 非接触・遠隔探傷 高速探傷 高い計測精度 曲面の計測が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 小型装置 高い計測精度 	<ul style="list-style-type: none"> 欠陥形状の把握 非接触探傷 遠隔探傷 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易 その場で叩き落し可能
短所	<ul style="list-style-type: none"> 外乱による 検出効率低下 大型装置 	<ul style="list-style-type: none"> 検査時間がかかる 曲面への密着が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 検査精度が低い コンクリート表面を熱する必要があり機材が大がかり 	<ul style="list-style-type: none"> 人工と検査時間がかかる (検査員 10 人で 1 時間 50 m)

赤外線検出法は打音法を適用する前のスクリーニング手法として注目されており、非接触・遠隔探傷が長所としてあげられる。トンネル内に赤外線検出法を適用する場合には、熱を強制的に与える必要があるが、トンネル覆工全体を検査する場合には、機材が大がかりになることや、高精度の計測が難しいといった欠点がある。

超音波探傷法は、小型装置であるがトンネル覆工曲面への密着に課題があり、検査者による高所作業となるうえ、検査時間を要するといった欠点がある。

また鉄道トンネル覆工検査の制約として、鉄道運行時間帯に検査ができないこと、線路走行可能な高所作業車を現地まで運行し手配しなければならないこと、鉄道運行用電力の停電措置を講じるといった時間が無視できないことが挙げられる。こうした実情に鑑み、筆者らは打音法のスクリーニング手法として、数m以上離れた箇所から検査できる、レーザーリモートセンシング法によるコンクリート剥離検知法（以下、本手法という）を開発した^{3, 4)}。

本手法を用いて、騒音や振動といった、レーザー計測におけるノイズ要因（以下、外乱という）が少ない環境条件下で検証試験を実施した結果、打音法で得られた検査結果とレーザーシステムで得られた検査結果が一致し、妥当性を確認した。この結果を基に、実際の新幹線トンネル内で実験を行った結果、保守用車や発電機の振動、騒音などの外乱により、計測困難な状態となった。そこで、保守用車や発電機の振動を低減させるため、新たに除振台を開発、防音室を設置し、レーザーシステムに具備したところ、レーザー照射口を開けた状態であっても計測可能な状態まで外乱を抑えることを可能とし、計測精度を向上させることができた。本論文では、本手法を開発するにあたっての課題とその解決策について述べる。

2. レーザーリモートセンシング法の原理

レーザーリモートセンシング法について説明する³⁾。打音法とレーザーリモートセンシング法は、コンクリート表面を加振し、表面振動を把握するという点で、欠陥検知の考え方は同一（図 - 2）である。そのためレーザーリモートセンシング法は、打音法に代替できる可能性がある。本手法の構成を図 - 3 に示す。コンクリート表面を加振するための加振用レーザーには、高出力のパルスレーザーを用いる。高出力パルスレーザーをコンクリート表面に集光することにより、コンクリート表面成分（セメントなど）をプラズマ化する。そのプラズマ粒子が弾き飛ばされる（アブレーションという）反動により、コンクリート表面の振動が励起される。計測用レーザーには、連続発振のレーザーを用いる。そのレーザーは、ビームスプリッターにより、信号光と参照光に分けられる。信号光はコンクリートの表面で反射されコンクリート表面形状の情報を持ってダイナミックホログラム結晶に入射する。一方で、参照光も同じダイナミックホログラム結晶に入射し、信号光と参照光がその中で干渉し合うことで、コンクリート表面形状の情報が含まれた干渉縞がダイナミックホログラム結晶中

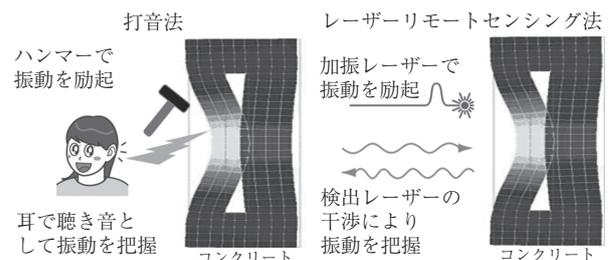


図 - 2 打音法とレーザーリモートセンシング法の比較

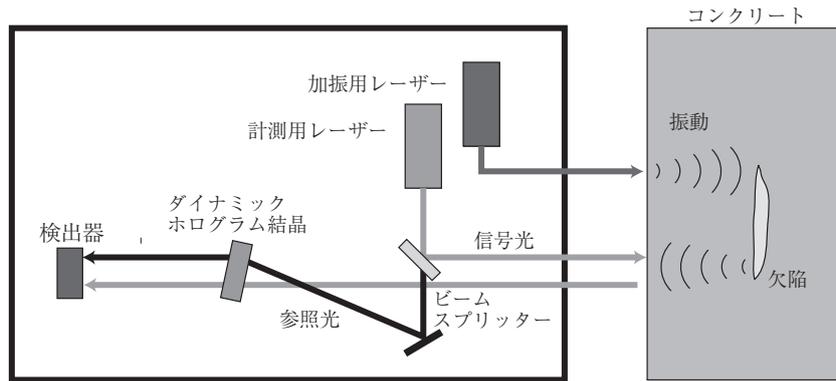


図 - 3 レーザーリモートセンシング法の構成

に形成される。

この干渉縞により、ダイナミックホログラム結晶内部に屈折率の粗密領域が生成され、参照光を回折させる。参照光は、信号光と同じ光軸を進み検出器に向かう。コンクリート表面が振動すると検出器に入射する信号光と参照光との位相差が変化する。この変化は検出器では光の強弱となってあらわれるため、これを検出することによりコンクリート表面の振動を検出する。

3. 現場試験機器の開発、振動・騒音対策

3.1 新幹線橋梁における検証試験

レーザーリモートセンシングシステムを搭載した試作1号機を開発した。試作1号機は可搬性を重視し、図-4に示すように軽トラックに搭載した。試作1号機を用いて、新幹線橋梁に対してコンクリート表面欠陥探傷試験を実施した。なお、当該橋梁の環境条件としては、騒音や振動などの外乱が少なく、微振動計測に適している場所である。写真-1に検証試験で実施した新幹線橋梁を示す。この橋梁は、支間7.0mのRC桁を高さ7.5mの杭基礎形式橋台で支持している。事前に打音法で欠陥箇所をスクリーニングを行って対象欠陥箇所を選定し、コンクリート表面加振試験によりコンクリート表面の振動スペクトルを計測したのち、試作1号機による結果と比較した。ここで、コンクリート表面加振試験とは、打音ハンマーを用いて調



写真 - 1 検証試験で実施した新幹線橋梁

査箇所であるコンクリート表面を打撃し、その際のコンクリート表面の振動から欠陥状況を検査する試験で、過去の検討^{5,6)}から、コンクリート表面を打撃した際に発する「音」スペクトルと、コンクリート表面振動のスペクトルは高い相関関係がある知見を得ており、この試験を打音法の代わりとして用いた。

図-5にコンクリート表面加振試験とレーザーリモートセンシング法による不健全箇所のフーリエ振幅スペクトルを示す。比較した結果、両者のフーリエ振幅スペクトルの形状はほぼ一致していることが分かる。



図 - 4 レーザーリモートセンシング法による試作1号機

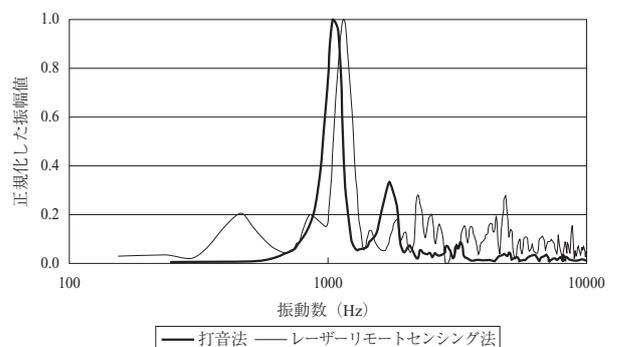


図 - 5 不健全箇所のフーリエ振幅スペクトル

3.2 新幹線トンネルにおける検証試験

試作1号機を用いて、夜間に実際の新幹線トンネル内で検証試験を実施した(図-6)。検証試験では、図-4に示した試作1号機を軌道用運搬台車(以下、トロという)上に固定し、軌道上のトロを牽引するディーゼル機関車(以下、保守用車という)に接続して実施した。現在の保守用車の運用ではエンジンを停止できないため、エンジンを駆動させた状態で、レーザーシステムにおける計測を試みた。その結果、レーザーリモートセンシング法による計測が困難であった。この原因として、保守用車の振動などによりノイズが混入すると推定された。そこで、計測に影響するような振動・騒音などを抑制するため除振台・防音室を構築した計測器を試作した。

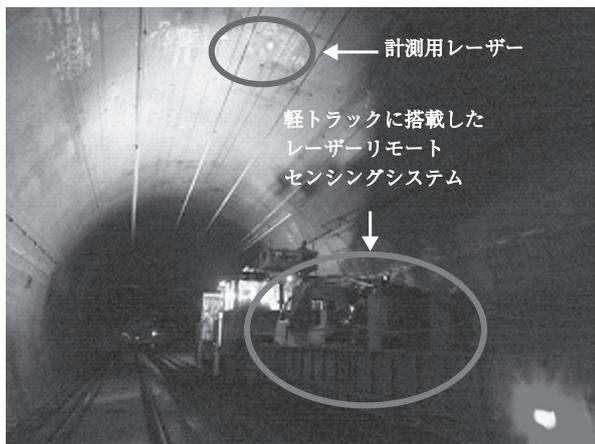


図-6 試作1号機による新幹線トンネルでの検証試験

3.3 除振台・防音室の性能確認試験

保守用車の振動影響を、除振台で低減させる効果を確認するために、箱型トロ上に除振台・光学定盤、レーザー光学系を搭載した試作2号機(図-7)を開発し、振動低減の確認試験を実施した。図-8に示した除振台の効果より、データを取得した周波数領域(100~4000 Hz)において、振動加速度を1/10~1/100程度に抑制できることを確認した。

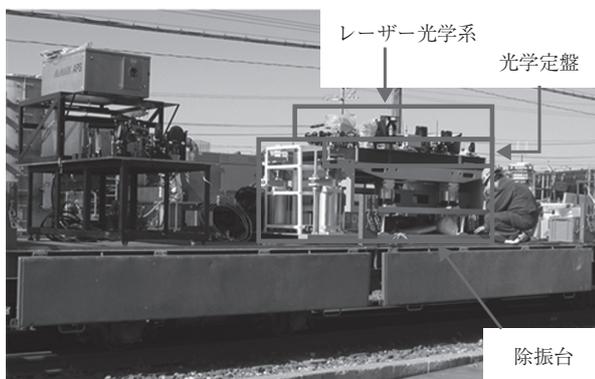


図-7 箱型トロ上の、除振台を搭載した試作2号機

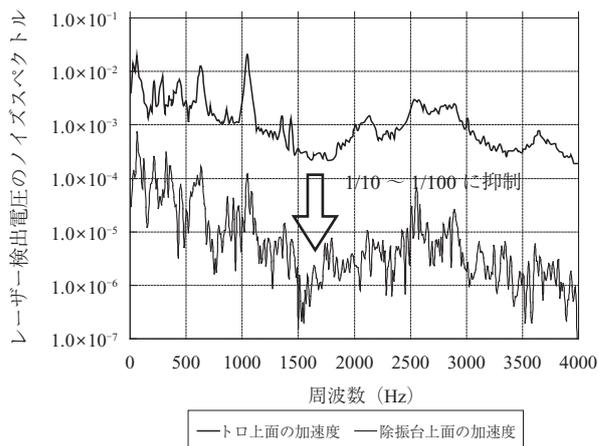


図-8 除振台の性能評価

騒音によりレーザー計測データに付加されるノイズを低減するために、防音室を構築(図-9)し、防音壁の有無によるレーザー検出電圧のノイズスペクトルを確認した(図-10)。防音壁の無い状態と、レーザー照射用のスリットを開口した状態を比較した結果、レーザー検出電圧でほぼ1/10~1/100程度に抑制できることを確認した。これらの対策の結果、信号が検出可能なシグナル/ノイズ比を得ることができた。

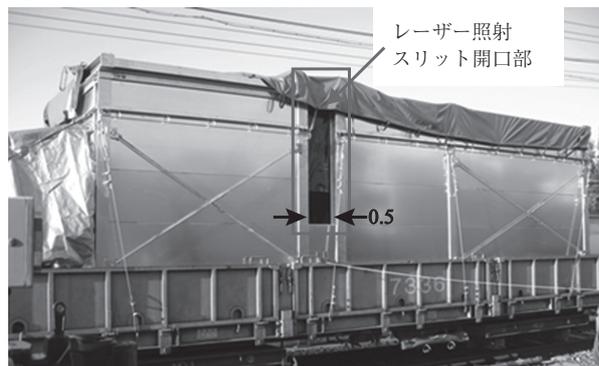


図-9 箱型トロ上の、防音室を搭載した試作2号機

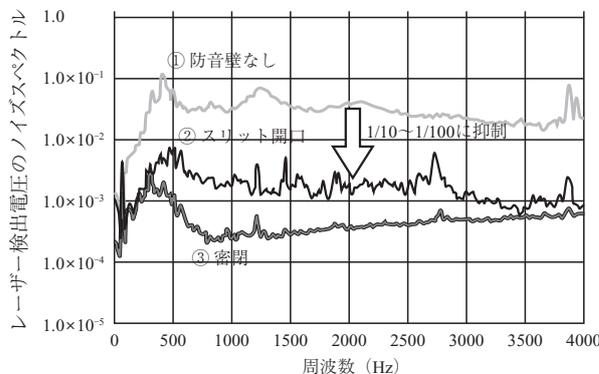


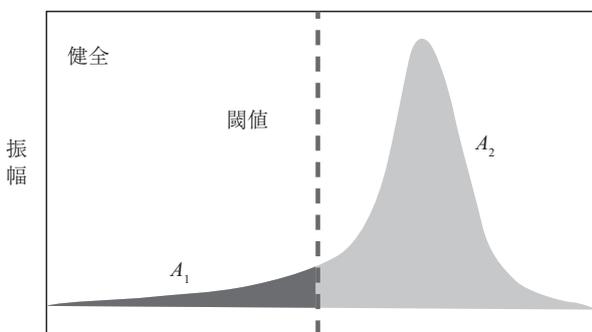
図-10 防音室の性能評価

4. 健全度判定アルゴリズム

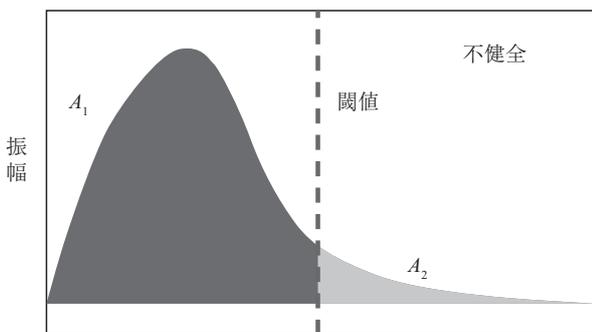
レーザーリモートセンシング法を実用化するためには、コンクリートの健全度の判定が可能な欠陥判定アルゴリズムの構築が必要である。

打音法における検査者の定性的判断を、定量化するため行った過去の研究^{4,7)}で、コンクリート表面の健全性は、コンクリート表面加振試験で評価できることが分かっている。ここでは、コンクリート表面加振試験で得られた振動スペクトルとレーザーリモートセンシング法で得られたそれを比較し、レーザーリモートセンシング法が打音法に代替できる実験結果を示す。

図 - 11 に欠陥判定アルゴリズムの概念を示す。健全箇所のコンクリート部材は、衝撃荷重を与えた際の残留振動のフーリエ振幅スペクトル上で相対的に高い周波数成分が卓越するが、欠陥箇所のコンクリート部材では、フーリエ振幅スペクトル上で相対的に低い周波数成分が卓越する。



(a) 健全箇所のフーリエ振幅スペクトルのイメージ



(b) 欠陥箇所のフーリエ振幅スペクトルのイメージ

図 - 11 欠陥判定アルゴリズムの概念

そこで、衝撃荷重を与えた際のコンクリート部材の揺れやすさを評価するために、フーリエ振幅スペクトル上で、ある閾値を境にした面積比を用いた式(1)に示すような欠陥判定アルゴリズムを提案した。

$$R_s = A_1 / (A_1 + A_2) \quad (1)$$

ここで、 A_1 はコンクリート表面の加速度波形から算出されたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より低い周波数成分におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 A_2

はコンクリート表面の加速度波形から算出されたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より高い周波数成分におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 R_s はフーリエ振幅スペクトルの面積比であり、スペクトルスコアと呼ぶ。実際の適用にあたっては、図 - 11 に示す閾値の設定が重要となる。そこで閾値の感度解析を実施し、打音法の結果と整合する閾値を検討した結果、適切な閾値は2000Hzであることが分かった^{4,7)}。

5. 提案した健全度判定アルゴリズムによる評価

現在、鉄道トンネルにおいては、コンクリートの表面の剥落に対する安全性についての健全度は α 、 β 、 γ で区分して判定を行っている⁸⁾。その打音検査と健全度判定の代替を目指し、レーザーリモートセンシング法を用いたコンクリート欠陥検出の可能性を確認するため、新幹線トンネル内(写真 - 2)において、保守用車を用いて試作2号機を搬入し、試験実施した。合せて、同一箇所で行音による加速度計計測(写真 - 3)を実施した。図 - 12に、検査者の判定と、レーザーリモートセンシング法およびコンクリート表面加振試験による欠陥判定アルゴリズムの試行箇所を示す。ここは、欠陥箇所に補修材を塗布した箇所である。また、トンネル覆工面に書かれている判定ランク α ⁸⁾は、検査者によるものであるが、「補修材の音」による判



写真 - 2 レーザーによる試験状況



写真 - 3 打音による加速度計計測試験状況

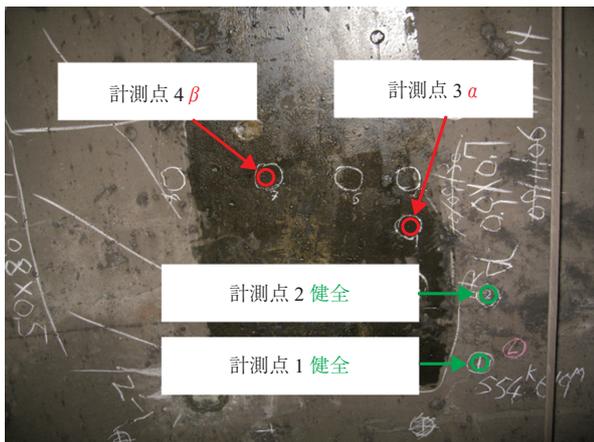


図 - 12 計測箇所における検査者の判定

定ランクと思われ、叩き落していない箇所である。

図 - 13 には、上記で提案したスペクトルスコアで評価したレーザー計測と打音による加速度計測の相関を示す。

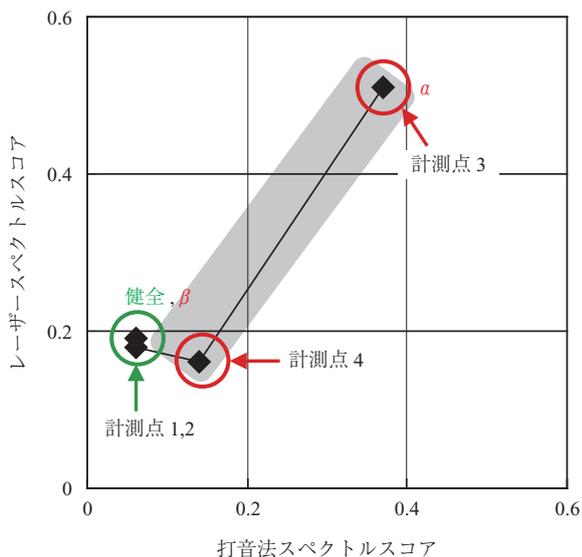


図 - 13 レーザーと打音のスペクトルスコアの相関

評価したのは図 - 12 における測定データの4点と少ないが、この結果から、スペクトルスコアが大きいほど不健全であるという傾向が見られ、レーザーリモートセンシング法とコンクリート表面加振試験には相関があると推察される。

レーザーリモートセンシング法によりコンクリートはく落危険性を判断するには、取得したデータから、 α 、 β 、 γ 、健全といった判定が必要⁸⁾である。現在まで、本手法で取得したデータは少ないため、今後試験を積み重ね、数多

くのデータから判定基準を分析することを考えており、レーザーリモートセンシング法と打音法の違いを考慮しながらもそのおのおの判定を可能にしたいと考えている。

6. ま と め

本研究では打音法に代わる検査法として、レーザーリモートセンシング法によるコンクリート部材の欠陥検出システムを開発した。以下に成果を述べる。

- ① 現場の振動・騒音環境において使用に耐えるため、除振台・防音室を備えたレーザーリモートセンシング法を用いたコンクリート部材の欠陥検出システムを開発した。
 - ② 保守用車の動作状態においても、レーザー計測可能な環境を実現できた。
- 今後の検討課題として、以下の2点をあげる。
- ① 打音法とレーザーリモートセンシング法の違いを考慮した、システムや判定アルゴリズムの構築が必要である。
 - ② 新幹線トンネルのトンネル覆工検査においては、保守用車運用によると保守基地から現場までの回送ロスが大きい。回送ロスの低減を念頭に置き、トンネル中央通路を走行できる小型化した測定システム（装置）として構築する必要がある。

本研究は、関係者の方々に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 足立紀尚：トンネル安全問題検討会－保生技術の確立－，日本鉄道施設協会誌，特集『コンクリート』，pp.14-15，2000.10
- 2) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），トンネル，丸善，2007
- 3) 島田義則：レーザー超音波リモートセンシング技術の産業応用，検査技術，Vol.11，No.9，pp.8-14，2006
- 4) 篠田昌弘，大村寛和，御崎哲一，島田義則，内田成明：レーザー加振によるコンクリート部材の非破壊検査法の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.12，pp.29-34，2009
- 5) 榎本秀明：トンネルの全般検査段階における健全度判断システムの開発－総研式打音検査装置の精度向上と判定基準の提案－，鉄道総研報告，2004
- 6) 篠田昌弘，大村寛和，阿部慶太，田中祐二，坂本寛章，神田政幸：レーザーによるコンクリート欠陥検知・健全度判定アルゴリズムの開発，鉄道総研報告，2011
- 7) 大村寛和，島田義則：レーザー超音波リモートセンシング装置を用いたコンクリート内部欠陥探傷－(2)ハンマー打撃によって発生する実構造物の表面振動・打音解析結果と欠陥検出アルゴリズム－，土木学会学術年次講演会，2008
- 8) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），トンネル，丸善，pp.12-18，2007

【2014年9月3日受付】